

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ**



**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

**до виконання курсової роботи з дисципліни  
«Теоретичні основи процесів кольорової металургії»  
для студентів заочної форми навчання  
за освітньо-професійною програмою  
«Технології та обладнання виробництва металів і сплавів»  
підготовки здобувачів вищої освіти  
за першим (бакалаврським) рівнем  
зі спеціальності 136 «Металургія»  
(Профіль: *МЕ06 «Металургія кольорових металів»*)**

**Дніпро НМетАУ 2016**

УДК 669.71

Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни «Теоретичні основи процесів кольорової металургії» для студентів заочної форми навчання за освітньо-професійною програмою «Технології та обладнання виробництва металів і сплавів» підготовки здобувачів вищої освіти за першим (бакалаврським) рівнем зі спеціальності 136 «Металургія» (Профіль: ME06 «Металургія кольорових металів») / Укл.: Г.А. Поляков, С.М. Підгорний, Г.М. Трегубенко, В.С. Ігнат'єв, Ю.О. Бубликов – Дніпро: НМетАУ, 2016. – 20с.

Наведені методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни «Теоретичні основи процесів кольорової металургії».

Призначена для студентів заочної форми навчання за освітньо-професійною програмою «Технології та обладнання виробництва металів і сплавів» підготовки здобувачів вищої освіти за першим (бакалаврським) рівнем зі спеціальності 136 «Металургія» (Профіль: ME06 «Металургія кольорових металів»).

Укладачі: Г.А. Поляков, ст. викладач  
С.М. Підгорний, ст. викладач  
Г.М. Трегубенко, д-р техн. наук, проф.  
В.С. Ігнат'єв, канд. техн. наук, проф.  
Ю.О. Бубликов, канд. техн. наук, доц.

Відповідальний за випуск М.І. Гасик, д-р техн. наук, проф.

Рецензент Л.В. Камкіна, д-р техн. наук, проф. (НМетАУ)

Підписано до друку \_\_\_\_\_. Формат 60x84 1/16. Папір друк. Друк плоский.  
Облік.-вид. арк. \_\_\_\_\_. Умов. друк. арк. \_\_\_\_\_. Тираж 100 пр. Замовлення № \_\_\_\_\_

Національна металургійна академія України  
49600, м. Дніпро-5, пр. Гагаріна, 4

---

Редакційно-видавничий відділ НМетАУ

## ВСТУП

Курсова робота "Розрахунки електрохімічних процесів отримання та рафінування металів" виконується студентами спеціальності 7.090402-металургія кольорових металів у III семестрі при вивченні дисципліни "Теоретичні основи електрометалургійних процесів". Робота містить типові розрахунки електрохімії металів і виконується за індивідуальними варіантами.

### 1. ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО ЕКВІВАЛЕНТА МЕТАЛУ

#### 1.1. Методика розрахунку

Електрохімічним еквівалентом металу  $q_{me}$  називається його теоретична кількість, яка повинна виділитися на катоді при проходженні через електролітичну ванну одиниці кількості електричного струму. Електрохімічний еквівалент виражається в грамах на ампер-годину (г/А.год.) Обчислення його проводиться на основі законів Фарадея за формулою

$$q_{me} = \frac{A}{Z \cdot F}, \quad (1.1)$$

де  $A$  - грам-атомна вага металу;

$Z$  - зміна валентності металу при електрохімічному процесі;

$F$  - число Фарадея (26,8 А.год./г).

Електрохімічний еквівалент звичайно використовується при розрахунку продуктивності електрохімічного процесу отримання металу. Величина продуктивності електролітичної ванни розраховується з виразу

$$g = q \cdot I \cdot \tau \cdot B_c / 10^5, \quad (1.2)$$

де  $q$  - електрохімічний еквівалент металу, г/А.год;

$I$  - сила струму, який проходить через ванну, А;

$\tau$  - час проходження струму, год;

$B_c$  - вихід по струму в %, який урахував втрати металу на побічні процеси.

## 1.2. Приклад розрахунку

Електролітична ванна для рафінування міді працює при силі струму 10 кА та при виході по струму 96%. Визначити електрохімічний еквівалент міді та годинну продуктивність ванни.

### Рішення

1. Електрохімічний еквівалент міді (за формулою 1.1)

$$q_{Cu} = \frac{63,54}{2 \times 26,8} = 1,185 \text{ г / А.год.}$$

2. Годинна продуктивність ванни (за формулою 1.2)

$$g = \frac{1,185 \times 10000 \times 1 \times 96}{10^5} = 11,37 \text{ кг / год.}$$

## 1.3. Контрольне завдання

Визначити електрохімічний еквівалент металу та добову продуктивність ванни при його отриманні електролітичним методом. Прийняти звичайну валентність металу та умовно вважати, що вихід по струму дорівнює 80% при силі струму ванни 5 кА.

№ варіанта	Метал	№ варіанта	Метал	№ варіанта	Метал
1	Al	10	Ca	18	Sn
2	Ba	11	Co	19	Pt
3	Be	12	Li	20	Hg
4	Bi	13	Mg	21	Pb
5	W	14	Mn	22	Ag
6	Fe	15	Mo	23	Cr
7	Au	16	Na	24	Zn
8	Cd	17	Ni	25	Ti
9	K				

## 2. РОЗРАХУНОК ПОТЕНЦІАЛУ РОЗКЛАДУ РЕЧОВИНИ

### 2.1. Методика розрахунку

Потенціал розкладу речовини є мінімальна різниця потенціалів зовнішнього джерела струму, яка забезпечує електроліз даної речовини. Потенціал розкладу  $E_{розк}$  дорівнює абсолютній величині суми рівноважних потенціалів розряду іонів на аноді та на катоді

$$E_{розк} = \left| E_a^o + E_k^o \right|, \quad (2.1)$$

Величину потенціалу розкладу речовини можливо також розрахувати на основі енергії Гіббса електрохімічної реакції за формулою

$$E_{розк.} = \frac{\Delta G}{Z \cdot F_T}, \quad (2.2)$$

де  $\Delta G$  - величина енергії Гіббса електрохімічної реакції, кДж /моль;

$Z$  - число електронів, які приймають участь в цій реакції (валентність металу);

$F_T$  - число Фарадея (96,4 кДж/г).

Потенціал розкладу деяких розплавлених галогенів наведено у додатку I.

Значення  $E_{розк.}$  використовують для розрахунку теоретичної питомої витрати електроенергії при електролітичному отриманні металів згідно з виразом

$$W_{теор.} = \frac{E_{розк.}}{q}, \quad (2.3)$$

де  $q$  - електрохімічний еквівалент металу, що одержують.

### 2.2. Приклад розрахунку

Розрахувати потенціал розкладу NaCl та визначити теоретичну питому витрату електроенергії на отримання 1 т натрію електролізом.

### Рішення

1. Електродні реакції при електролізі NaCl: на катоді:  $\text{Na}^+ + e \leftrightarrow \text{Na}$   
на аноді:  $2\text{Cl}^- - 2e \rightarrow \text{Cl}_{2(g)}$ ; сумарна:  $2\text{NaCl} \rightarrow \text{Na}_k + \text{Cl}_{2(g)}$ .
2. Знаходимо потенціал розряду іонів  $\text{Na}^+$  і  $\text{Cl}^-$ . Для реакції  $\text{Na}^+ + e \rightarrow \text{Na}$   $E_k^0 = -2,71\text{В}$ , а для реакції  $2\text{Cl}^- - 2e \rightarrow \text{Cl}_2$   $E_a^0 = -1,36\text{В}$ . Е.д.с. гальванічного елемента за формулою 2.1  $E^0 = -2,71 + (-1,36) = -4,07\text{В}$ . Потенціал розкладу  $E_{\text{розк}}$  для NaCl рівняється по абсолютній величині  $E^0$ , тобто  $E_{\text{розк}} = |E^0| = 4,07\text{В}$ .
3. Розраховуємо енергію Гіббса, кДж/моль, для реакції електролітичного розкладу NaCl.

$$\Delta G = 2\Delta G_{\text{Na}} + \Delta G_{\text{Cl}_2} - 2\Delta G_{\text{NaCl}} = 2 \cdot 0 + 0 - 2 \cdot 384 = -768 \text{ кДж/моль.}$$

4. Потенціал розкладу NaCl ( за формулою 2.2)

$$E_{\text{розк}} = \frac{768}{2 \cdot 96,4} = 3,98 \approx 4\text{В}$$

5. Теоретична питома витрата електроенергії ( за формулою 2.3)

$$W_{\text{теор}} = \frac{4 \times 1000}{0,858} = 4662 \text{ кВт} \cdot \text{год.} / \text{т.}$$

### 2.3. Контрольне завдання

Розрахувати потенціал розкладу солі та визначити теоретичну питому витрату електроенергії на електролітичний розклад цієї солі:

№ варіанта	Сіль	№ варіанта	Сіль	№ варіанта	Сіль
1	KCl	11	AlCl <sub>3</sub>	21	MgF <sub>2</sub>
2	LiCl	12	CaCl <sub>2</sub>	22	FeCl <sub>2</sub>
3	TiCl <sub>4</sub>	13	FeCl <sub>2</sub>	23	BaCl <sub>2</sub>
4	MnCl <sub>2</sub>	14	PbCl <sub>2</sub>	24	CdCl <sub>2</sub>
5	BeCl <sub>2</sub>	15	SnCl <sub>2</sub>	25	CrCl <sub>3</sub>
6	CuCl	16	CaF <sub>2</sub>		
7	PbCl <sub>2</sub>	17	BeF <sub>2</sub>		
8	ZnCl <sub>2</sub>	18	MgCl <sub>2</sub>		
9	AlF <sub>3</sub>	19	AgCl		
10	KF	20	BiCl <sub>3</sub>		

### 3. ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ КОНЦЕНТРАЦІЇ РЕЧОВИНИ НА ПОТЕНЦІАЛ ЇЇ РОЗКЛАДУ ПРИ ЕЛЕКТРОЛІЗІ

#### 3.1. Методика розрахунку

Вплив концентрації речовини у розчині на потенціал її розкладу при електролізі дозволяє визначити формула Нернста для рівноважного потенціалу електродів  $E$

$$E = E^o + \frac{RT}{ZF} \ln C = E^o + \frac{0,0002}{Z} \cdot T \cdot \lg C, \quad (3.1)$$

де  $E$  - стандартний електродний потенціал при 298 К та концентрації іона металу в розчині 1г-іон/л, В;

$Z$  - валентність металу;

$T$  - температура розчину, К;

$C$  - концентрація металу в розчині, г-іон/л.

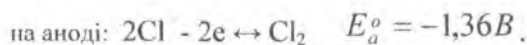
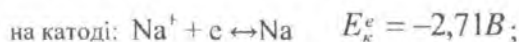
З формули Нернста виходить, що чим нижче концентрація іона, який розряжається, та більше енергії необхідно для його розряду і потенціал розкладу речовини буде вищим.

#### 3.2. Приклад розрахунку

Розрахувати потенціал розкладу  $\text{NaCl}$  при  $25^\circ\text{C}$  на платиновому електроді, якщо концентрація іонів натрію в розчині дорівнює  $10^{-2}$ , а іонів хлору –  $10^{-3}$ .

#### Рішення

1. На платинових електродах потенціали розряду іонів дорівнюють рівноважним:



2. За формулою Нернста знаходимо електродні потенціали катоду та аноду для даних концентрацій:

$$E_{\kappa} = 2,71 + 0,0002 \cdot 298 \cdot \lg(10^{-2}) = -2,83\text{В};$$

$$E_a = -1,36 + 0,0002 \cdot 298 \cdot \lg(10^{-3}) = -1,54 \text{ В.}$$

3. Потенціал розкладу NaCl

$$E_{\text{розк}} = [(-2,83) + (-1,54)] = 4,37 \text{ В.}$$

### 3.3. Контрольне завдання

Розрахуйте потенціал розкладу хлориду даного металу, якщо концентрація іонів даного металу в розчині 0,1 г-іон/л, а концентрація іонів хлору - 0,0001 г-іон/л.

№ варіанта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Метал	Ag	Al	Ba	Ca	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	K	Li
№ варіанта	12	13	14	15	16	17	18	19	20		
Метал	Mg	Na	Ni	Pb	Sn	Zn	Cs	Rb	Sr		
№ варіанта	21	22	23	24	25						
Метал	Be	Hg	Sb	Au	Mn						

## 4. ВИЗНАЧЕННЯ ПОСЛІДОВНОСТІ РОЗРЯДУ ІОНІВ В ЕЛЕКТРОЛІТІ

### 4.1. Методика розрахунку

При електролізі розчинів, що містять суміш катіонів, перш за все на катоді буде осаджуватися метал з солі, яка має найменший потенціал розкладу, а на аноді, в першу чергу, буде розряджуватися іон з найбільшим потенціалом розкладу.

### 4.2. Приклад розрахунку

Які елементи виділяться на катоді при електролізі розчину, який містить  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{CaCl}_2$ , та  $\text{PbCl}_2$ , якщо різниця потенціалів на електродах становить 3 В?



## Рішення

1. Знаходимо з додатку 1 потенціали розкладу розплавлених хлоридів

$$E_o^{M_{KCl_2}} = 2,51 B; E_o^{CaCl_2} = 3,38 B; E_o^{KCl} = 3,58 B; E_o^{PbCl_2} = 1,27 B.$$

2. Послідовність виділення іонів.

При заданій різниці потенціалів (3В) на катоді можливе виділення тільки свинцю та магнію. При цьому, в першу чергу, виділяється метал з найменшим потенціалом розкладу, тобто, свинець. Після виділення свинцю на катоді почне осаджуватися магній. Після закінчення виділення магнію процес електролізу закінчиться, так як для розкладу солей KCl та CaCl<sub>2</sub>, що залишилися, потрібна більш висока різниця потенціалів. Таким чином, на катоді утвориться сплав свинцю з магнієм, а залишиться соляний розчин, який очищений від цих металів.

### 4.3. Контрольне завдання

Перед електролітичним виділенням металу з водного розчину, який містить домішки катіонів інших металів, здійснюють очисний електроліз, при якому іони домішків розряджають до металів та виводять їх тим самим з електроліту.

Які з перелічуваних нижче домішок, і в якій послідовності будуть виділятися з електроліту на інертних електродах без виділення основного металу? Відповідь мотивувати, зазначивши рівняння катодних процесів.

№ варіанта	Основний метал	Домішки	№ варіанта	Основний метал	Домішки
1	2	3	4	5	6
1	Zn	Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> , Cr <sup>3+</sup>	14	Fe	Ni <sup>2+</sup> , Cu <sup>2+</sup> , Ca <sup>2+</sup>
2	Zn	Cu <sup>2+</sup> , Ag <sup>+</sup> , Cd <sup>2+</sup>	15	Ag	Cu <sup>2+</sup> , Fe <sup>2+</sup> , Fe <sup>3+</sup>
3	Cu	Na <sup>+</sup> , Al <sup>3+</sup> , Mn <sup>2+</sup>	16	Ag	Bi <sup>3+</sup> , Pb <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup>
4	Cu	Mn <sup>2+</sup> , Zn <sup>2+</sup> , Bi <sup>3+</sup>	17	Zn	K <sup>+</sup> , Cu <sup>2+</sup> , Cr <sup>3+</sup>
5	Ni	K <sup>+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Bi <sup>3+</sup>	18	Cu	Al <sup>3+</sup> , Zn <sup>2+</sup> , Bi <sup>3+</sup>

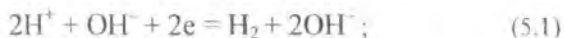
1	2	3	4	5	6
6	Ni	Co <sup>2+</sup> , Cd <sup>2+</sup> , Pb <sup>2+</sup>	19	Ni	Bi <sup>3+</sup> , Cd <sup>2+</sup> , Pb <sup>2+</sup>
7	Cr	Cu <sup>2+</sup> , Fe <sup>2+</sup> , Fe <sup>3+</sup>	20	Cr	Na <sup>+</sup> , Mn <sup>2+</sup> , Fe <sup>2+</sup>
8	Cr	Ni <sup>2+</sup> , Mn <sup>2+</sup> , K <sup>+</sup>	21	Sn	Hg <sup>2+</sup> , Cd <sup>2+</sup> , Cu <sup>2+</sup>
9	Sn	Pb <sup>2+</sup> , Cu <sup>2+</sup> , Cd <sup>2+</sup>	22	Pb	Fe <sup>2+</sup> , Zn <sup>2+</sup> , Cu <sup>2+</sup>
10	Sn	Bi <sup>3+</sup> , Zn <sup>2+</sup> , Hg <sup>2+</sup>	23	Fe	Mg <sup>2+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , K <sup>+</sup>
11	Pb	Zn <sup>2+</sup> , Ag <sup>+</sup> , Bi <sup>3+</sup>	24	Ag	Al <sup>3+</sup> , Fe <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup>
12	Pd	Cd <sup>2+</sup> , Cu <sup>2+</sup> , Fe <sup>2+</sup>	25	Ni	K <sup>+</sup> , Cd <sup>2+</sup> , Co <sup>2+</sup>
13	Fe	Na <sup>+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Al <sup>3+</sup>			

## 5. ВИЗНАЧЕННЯ ПРОДУКТІВ ЕЛЕКТРОЛІЗУ

### 5.1. Методика розрахунків

При визначенні продуктів електролізу водних розчинів слід мати на увазі, що:

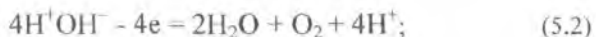
- при наявності в електроліті солей Zn, K, Ca, Na, Mg, Al на катоді буде виділятися не метал, а водень за реакцією



- при електролізі водних розчинів солей Cu, Hg, Ag, Au ці метали виділяються на катоді;

- при електролізі водних розчинів солей Mn, Zn, Fe, Co, Sn, Pb на катоді можливе спільне виділення металу та водню;

- при електролізі кисеньвміщуючих солей (сульфати, нітрати, фосфати) на аноді виділяється кисень за реакцією



- при електролізі розплавлених солей, в основному галогенів, на катоді виділяються найбільш активні метали, а на аноді виділяється газ за схемою



де – X – Cl, F.

## 5.2. Приклад розрахунку

Написати рівняння електродних процесів та вказати речовини, які виділяються на катоді та аноді при електролізі водного розчину  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  з інертним катодом.

### Рішення

#### 1. Катодні процеси (за формулою 5.1)

На катоді замість виділення натрію буде відбуватися електрохімічне відновлення води, яке супроводжується виділенням водню:  $2\text{H}_2\text{O} + 2e = \text{H}_2\uparrow + 2\text{OH}^-$ .

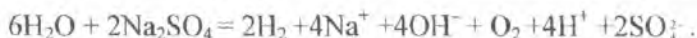
#### 2. Анодні процеси (за формулою 5.2)

Сіль представляє собою сульфат натрію. Тому на аноді буде відбуватися електрохімічне окислення води, що приводить до виділення кисню



#### 3. Підсумовуюче рівняння процесу електролізу.

Якщо помножити рівняння катодного процесу на 2 та скласти його з рівнянням анодного процесу, отримаємо сумарне рівняння процесу електролізу



## 5.3. Контрольне завдання

Які процеси протікають на інертних електродах і які речовини виділяються на катоді та аноді при електролізі водного розчину даної солі?

№ варіанта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Сіль	$\text{CuCl}_2$	$\text{AgNO}_3$	$\text{K}_2\text{SO}_4$	$\text{AlCl}_3$	$\text{MgCl}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{NiSO}_4$	$\text{BaCl}_2$	$\text{BaSO}_4$	$\text{KCl}$
№ варіанта	11	12	13	14		15	16	17		18
Сіль	$\text{NaCl}$	$\text{LiCl}$	$\text{CaCl}_2$	$\text{Zn(NO}_3)_2$		$\text{CdSO}_4$	$\text{PbSO}_4$	$\text{Sn(NO}_3)_2$		$\text{PbCl}_2$
№ варіанта	19	20	21		22		23	24	25	
Сіль	$\text{SnCl}_2$	$\text{MnSO}_4$	$\text{MnCl}_2$		$\text{Ni(NO}_3)_2$		$\text{ZnCl}_2$	$\text{NiCl}_2$	$\text{CaF}_2$	

## 6. РОЗРАХУНОК ВЕЛИЧИНИ ПЕРЕНАПРУГИ ВИДІЛЕННЯ ВОДНЮ ТА КИСНЮ ПРИ ЕЛЕКТРОЛІЗІ ВОДНИХ РОЗЧИНІВ

### 6.1. Методика розрахунку

При електролізі водних розчинів важливе значення мають процеси розряду на аноді основного компонента електроліту – води. Рівноважний потенціал розряду води на платиновому аноді за реакцією  $2\text{H}_2\text{O} = \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}$  складає  $E_o^o = -1,23\text{В}$ . Але на практиці розряд води з виділенням кисню погребус значно більшої енергії і фактичний потенціал на  $0,7\text{-}1,3\text{В}$  більш негативний рівноважного. Аналогічно кисню виділення водню також проходить при значно більшій напрузі. Величина перенапруги виділення водню та кисню з водних розчинів на різних катодах наведена у додатку 2.

Перенапряга  $\Delta U$  представляє собою різницю між фактичною величиною потенціалу розкладу речовини і теоретичним потенціалом розкладу, який визначається за рівноважними потенціалами електродних процесів. Перенапряга при виділенні металів, особливо з розчинів, мала і її можливо не враховувати. Але при виділенні водню та кисню в процесі електролізу водних розчинів урахування перенапруги необхідно здійснювати.

### 6.2. Приклад розрахунку

В якій послідовності і при якому потенціалі будуть виділятися метали та водень з нейтрального водного розчину сульфатів, який містить по  $1\text{ г-іон/л}$  заліза та кобальту і  $10^{-7}\text{ г-іон/л}$  водню, при електролізі на платиновому катоді?

#### Рішення

1. Рівноважні потенціали розряду іонів Fe та Co.

За табличними даними [1] знаходимо  $E_o^{Fe} = -0,44\text{В}$  та  $E_o^{Co} = -0,28\text{В}$ .

2. Потенціал розряду водню на платиновому катоді за формулою ( 3.1)

$$E_o^{H_2} = (0,0002/1) \cdot 298 \cdot \lg 10^{-7} = -0,41\text{В}.$$

### 3. Послідовність виділення металу.

Раніше всіх на катоді розряжається той іон, рівноважний потенціал розряду якого найбільш позитивний. Отже, першим на катоді буде виділятися кобальт, який утворює кобальтове покриття на платині.

### 4. Потенціал розряду водню.

Перенапряга виділення водню на кобальті  $\Delta U_{H_2} = -0,5$  В (Додаток 2).

При цьому потенціал розряду водню на кобальті складас  $E_{H_2} = 0,41 + 0,50 = -0,91$ В. Залізо ( $E_{Fe}^{f_0} = -0,44$ В) виділяється на поверхні кобальту і збільшує різницю потенціалів, яка необхідна для розряду іонів  $H^+$ . Перенапряга водню на залізі 0,6В. Таким чином, потенціал виділення водню складас

$$E_{H_2}^0 = 0,41 + 0,60 = 1,01$$
В.

### 6.3. Контрольне завдання

З урахуванням перенапряги виділення водню та кисню розрахувати потенціал розкладу водного розчину  $Na_2SO_4$  при використанні слідуючих електродів:

№ варіанта	Катод	Анод	№ варіанта	Катод	Анод	№ варіанта	Катод	Анод
1	Pt	Pt	11	Au	Au	21	C	Ni
2	Fe	C	12	Fe	Ni	22	Ni	Au
3	Ti	Cu	13	Hg	Pt	23	Fe	Ag
4	Hg	Ag	14	Pb	Cu	24	Fe	Au
5	Pb	Ni	15	Ti	Pt	25	Cu	C
6	Hg	Pt	16	Ag	Ni			
7	Ti	C	17	Ti	Fe			
8	Pb	C	18	Hg	C			
9	Pt	Au	19	Cu	Fe			
10	Ag	Ag	20	Cu	Cu			

## 7. ЗАСТОСУВАННЯ ЗАКОНІВ ФАРАДЕЯ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ПОКАЗНИКІВ ЕЛЕКТРОЛІЗУ

### 7.1. Методика розрахунку

Згідно з законами Фарадея кількість речовини  $m$ , яка виділяється при електролізі, пропорційно електрохімічному еквіваленту речовини ( $q$ ), силі струму ( $I$ ) та часу проходження струму через електроліт ( $\tau$ )

$$m = q \cdot I \cdot \tau, \quad (7.1)$$

В кольоровій металургії закони Фарадея використовують, частіше за все, для визначення виходу по струму  $B_c$  при електролізі, тобто для виразу в % відношення кількості фактично отриманого металу  $m_{\text{факт.}}$  до теоретично можливого  $m_{\text{теор.}}$

$$B_c = \frac{m_{\text{факт.}}}{m_{\text{теор.}}}. \quad (7.2)$$

### 7.2. Приклад розрахунку

Визначити вихід по струму при електролізі розчину  $\text{CuSO}_4$ , якщо на протязі 2 годин через розчин пропускали струм силою 5А і на катоді виділилося 11,2 г металу.

#### Рішення

1. Кількість міді, яка повинна виділитися відповідно законам Фарадея (за формулою 7.1):

$$m_{\text{теор.}} = 0,592 \times 5 \times 2 = 11,86 \text{ г,}$$

де 0,592 – електрохімічний еквівалент міді, г/А·год

2. Вихід по струму для електролізу міді (за формулою 7.2):

$$B_c = \frac{11,20}{11,86} \times 100 = 94\%.$$

### 7.3. Контрольне завдання

Скільки металу можливо отримати при електролізі розчину його солі, якщо на протязі єдиної години пропускати струм силою 10 кА при виході по струму 80%?

№ варіанта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Метал	Cu	Al	Ag	Ni	Pb	Zn	Fe	Bi	Mn	Sn	Sb	K	Na
№ варіанта	14	15	16	17	18	19	20	21		22	23	24	25
Метал	Ca	Ba	Mg	Co	Hg	Au	Cd	Mo		Ti	Be	Li	Rb

## 8. РОЗРАХУНОК ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ПРИ ЕЛЕКТРОЛІЗІ

### 8.1. Методика розрахунку

Використання електроенергії при електролізі характеризується величинами виходу по струму, виходу по енергії та питомої витрати електроенергії.

Вихід по струму показує використання струму електролізу за призначенням і визначається з виразу (7.2).

Для характеристики ефективності використання електроенергії використовують також показники питомої витрати електроенергії та виходу по енергії.

Величина фактичної питомої витрати електроенергії визначається за формулою

$$W_{\phi} = \frac{U_p}{q \cdot B_c}, \quad (8.1)$$

де  $U_p$  – робоча напруга на ванні, В;  $q$  – електрохімічний еквівалент металу, г/А·год.  $B_c$  – вихід по струму, частка одиниці.

Вихід по енергії ( $B_e$ ) дорівнює відношенню

$$B_e = \frac{W_\tau}{W_\phi} = \frac{E_{\text{розк}} \cdot B_e}{U_p}, \quad (8.2)$$

де  $W_\tau$  - теоретична питома витрата електроенергії, кВт·год/т;

$E_{\text{розк}}$  - напруга розкладу сполуки металу, В.

## 8.2. Приклад розрахунку

Алюмінієвий електролізер працює з силою струму 260 кА і за добу видає 1,8 т алюмінію. Середня напруга на ванні 4,1В, теоретична напруга розкладу  $Al_2O_3$  дорівнює 1,2В. Які вихід по струму, питома витрата електроенергії та вихід по енергії?

### Рішення

Якщо підставити у рівняння (7.2, 8.1, 8.2) відповідні величини, отримаємо:

$$B_c = \frac{m_{\text{факт}}}{q \cdot I \cdot \tau} = \frac{1,8 \times 10^3}{0,3355 \times 260 \times 24} = 0,86;$$

$$W_\phi = \frac{U_p}{q \cdot B_e} = \frac{4,1 \times 10^3}{0,3355 \times 0,86} = 14210 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{т};$$

$$B_e = \frac{E_{\text{розк}} \cdot B_c}{U_p} = \frac{1,2 \times 0,86}{4,1} = 0,25.$$

## 8.3. Контрольне завдання

Серія з 150 електролізерів, маючих робочий струм  $I$ , видала за 30 діб  $P$  тон алюмінію марки А5 (99,5%). Середня напруга на ванні дорівнює  $U_p$ . Визначити вихід по струму, питому витрату електроенергії, вихід по енергії.



№ варіанта	I, кА	P, г	U <sub>p</sub> , В	№ варіанта	I, кА	P, г	U <sub>p</sub> , В
1	2	3	4		6	7	8
1	62,5	1960	4,55	14	160	4996	4,33
2	62,5	1980	4,60	15	160	5016	4,38
3	62,5	2000	4,65	16	175	5379	4,44
4	125	3840	4,61	17	175	5399	4,40
5	125	3860	4,66	18	175	5419	4,54
6	125	3880	4,71	19	225	7197	4,81
7	142	4262	4,79	20	225	7217	4,86
8	142	4282	4,84	21	225	7237	4,91
9	142	4303	4,89	22	255	7327	4,12
10	170	5411	4,50	23	255	7347	4,17
11	170	5431	4,55	24	255	7367	4,22
12	170	5451	4,60	25	255	7407	4,14
13	160	4976	4,28				

## 9. ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОВОГО ЕФЕКТУ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОЇ РЕАКЦІЇ

### 9.1. Методика розрахунку

Кількість тепла, яка виділяється в ванні при електролізі, визначається за формулою

$$Q = 3,6 \cdot I(U_p - E_T \cdot B_c), \quad (9.1)$$

де I – сила струму електролізера, А;

U<sub>p</sub> – напруга на ванні, В;

B<sub>c</sub> – вихід по струму, частка одиниці;

E<sub>T</sub> – тепла напруга розкладу, яка розрахована з виразу

$$E_T = \frac{\Delta H_T}{Z \cdot F_T}, \quad (9.2)$$

де  $\Delta H_T$  – тепловий ефект реакції, кДж;

$Z$  – валентність металу;

$F_T$  – число Фарадея (96,4 кДж/г).

## 9.2. Приклад розрахунку

Середній вихід по струму в алюмінієвому електролізері з навантаженням 150 кА дорівнює 88%. Робоча напруга на ванні 4,20В. Склад газу, який отримано при спалюванні аноду: 55% об.  $\text{CO}_2$  та 45% об.  $\text{CO}$ .

Теплоти реакцій при  $950^\circ\text{C}$ :



Яка кількість джоулевого тепла виділиться за 1 годину в електролізері?

### Рішення

1. Теплова напруга розкладу для реакції (за формулою 9.2):

$$а) E_T^a = \frac{2976}{6 \cdot 96,4} = 2,25 \text{ В};$$

$$б) E_T^b = \frac{2058,6}{12 \cdot 96,4} = 1,78 \text{ В}.$$

2. Доля корисного струму, який витрачається на реакцію, визначається величиною виходу по струму:

$$а) B_c^{(a)} = \frac{P_{\text{CO}}}{2P_{\text{CO}_2} + P_{\text{CO}}} = \frac{45}{2 \cdot 55 + 45} = 0,29;$$

$$б) B_c^{(b)} = 1 - 0,29 = 0,71.$$

В розрахунку прийнято, що на утворення 1 моля  $\text{CO}_2$  витрачається в 2 рази більше енергії, ніж на 1 моль  $\text{CO}$ .

3. Годинна кількість джоулевого тепла, яка виділяється в ванні (за формулою 9.1),

$$Q_T = 3,6 \cdot 150000 [4,20 - 0,88(2,255 - 0,29 + 1,78 - 0,71)] = 1354320 \text{ Дж/год.}$$

### 9.3. Контрольне завдання

Визначити кількість джоулевого тепла, яке виділяється за 1 годину в алюмінієвому електролізері з силою струму  $I$  при напрузі на ванні  $U_p$  і виході по струму  $V_c$ . Прийняти, що анодний газ вміщує рівні об'єми  $CO$  та  $CO_2$ .

№ варіанта	$I, \text{kA}$	$U_p, \text{В}$	$V_c, \%$	№ варіанта	$I, \text{kA}$	$U_p, \text{В}$	$V_c, \%$
1	70	4,55	88	14	160	4,33	90
2	70	4,60	89	15	160	4,38	91
3	70	4,65	90	16	175	4,44	91
4	125	4,61	89	17	175	4,49	92
5	125	4,66	90	18	175	4,54	93
6	125	4,71	91	19	225	4,81	91
7	142	4,79	90	20	225	4,86	92
8	142	4,84	91	21	225	4,91	93
9	142	4,89	92	22	250	4,12	89
10	170	4,50	91	23	250	4,17	90
11	170	4,55	92	24	250	4,22	91
12	170	4,60	93	25	250	4,27	92
13	160	4,28	89				

### Література

1. Уикс К.Е., Блок Ф.Е. Термодинамические свойства 65 элементов, их окислов, галогенидов, карбидов и нитридов. - М.: Металлургия, 1965. - 240 с.
2. Флеров В.И. Сборник задач по прикладной электрохимии. Учеб. пособие для вузов. Изд.2-е. - М.: Высшая школа. 1976.- 309 с.
3. Задачник по общей химии для металлургов. Под ред.Б.Г.Коршунова. Учеб.пособие для вузов. -М.: Высшая школа, 1977.-255 с.

## Потенціал розкладу деяких розплавлених галогенідів

Сіль	U, В	Сіль	U, В	Сіль	U, В
CsCl	3,77	CdCl <sub>2</sub>	1,34	AgCl	0,85
BaCl <sub>2</sub>	3,62	PbCl <sub>2</sub>	1,27	CuCl	0,97
KCl	3,58	SnCl <sub>2</sub>	1,15	BiCl <sub>2</sub>	1,02
LiCl	3,41	MnCl <sub>2</sub>	1,89	LiF	2,20
CaCl <sub>2</sub>	3,38	ZnCl <sub>2</sub>	1,60	NaF	2,76
NaCl	3,35	TiCl	1,64	KF	2,54
MgCl <sub>2</sub>	2,51	NiCl <sub>2</sub>	1,03	CaF <sub>2</sub>	2,40
AlCl <sub>3</sub>	1,90	CoCl <sub>2</sub>	0,97	MgF <sub>2</sub>	2,25

## Величина перенапруги виділення водню та кисню з водних розчинів на різних катодах

Катод	$\Delta U_{H_2}, В$	$\Delta U_{O_2}, В$	Катод	$\Delta U_{H_2}, В$	$\Delta U_{O_2}, В$
Платина	0,16	1,3	Золото	0,6	1,3
Срібло	0,8	1,0	Нікель	0,5	0,7
Залізо	0,6		Кобальт	0,5	
Титан	1,0		Вольфрам	0,5	
Мідь	0,7		Олово	1,1	
Цинк	1,4		Ртуть	1,2	
Свинець	1,4		Хром	0,8	
Графіт		1,1	Кадмій	1,3	